静圧空気軸受に関する研究 (第 3 報)*

—— 静圧ジャーナル空気軸受の軸受圧力と負荷能力——

十 合 晋 —**

Study on Externally Pressurized Air Bearings (Part III)

—— Pocket Pressure and Load Carrying Capacity of Journal Bearings——

Shinichi TOGO

This paper describes pocket pressure and load carrying capacity of an externally pressurized cylindrical air journal bearing. An analysis of pocket pressure under concentric condition is given on the assumption that the flow condition of air in the bearing clearance is an adiabatic viscous flow and by considering the effect of temperature drop. Pocket pressures under eccentric condition are obtained by considering the circumferential flow of air in the bearing clearance. From these pocket pressures, the load carrying capacity is obtained.

Experimental results show a good agreement with theoretical values.

1. 序 論

静圧空気軸受の軸受圧力は負荷能力をはじめとし、軸受の諸性能を決定するためにきわめて重要である。第 2 報¹⁾では導電紙を用いて軸受内の圧力分布を実験的に求める方法を述べた。一般に軸受内の空気の状態変化は静圧軸受として用いられる条件のもとにおいては断熱変化に近いものと考えられる。そこで軸受内の空気の流れを断熱変化の粘性流とし、空気の温度降下による影響を考慮にいれて円筒形ジャーナル軸受の同心状態におけるポケット圧力の理論を導いた。さらに、軸受内の空気の円周方向流れを考慮にいれて偏心した場合のポケット圧力を与える式を求め、それをもとにして負荷能力を与える式を導いた。本報告において、これらの理論ならびにそれに関して行なった実験との比較検討を述べることにしたい。

2. 軸受圧力ならびに負荷能力の理論

2.1 同心状態におけるポケット圧力

図 1 に示すような軸直径が D 、ラジアルすきまが h_0 、軸受長さが l で円周上にオリフィスしぼりを持つポケットが n 個で 2 列配置された形の静圧ジャーナル空気軸受の同心状態におけるポケット圧力 P_p を計算する。根本の仮定は、オリフィスを通る空気流は断熱変化の噴流であり、軸受内の空気の流れの状態は断熱変化の粘性流をなすものとしたことで、空気の比重量および粘性係数の温度による変化を考慮にいれて導いた。なお、軸の高速回

転による動圧効果は無視した。軸受内の軸方向圧力分布は図 1 付図(a)に示す形のものとする。またオリフィスを通してポケット内に流入した空気は図 1 付図(b)に示すとき幅 $\pi D/n$ 、長さ l_2 、すきま h_0 の長方形平行すきまを通る軸方向一次元粘性流となって大気中に排出されるものとする。さて、この長方形平行すきまを通る一次元空気流において、圧力 P_p の端面より距離 x にある微小長さ dx を通過する空気の容積 V は粘性流の公式から次式のように与えられる。

$$V = -\frac{\pi D h_0^3}{12 \eta n} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

ここに η は空気の粘性係数で温度 $T^\circ\text{K}$ に対し $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$

付図(a)軸方向圧力分布 付図(b)長方形平行すきま

図 1 静圧ジャーナル空気軸受

*原稿受付 昭和42年11月27日。昭和42年度 精機学会春季大会 (昭和42年4月4日)にて発表。

**正 会 員 電気試験所(東京都中央区銀座東8-19)

単位で次式によって与えられる²⁾ものである。

$$\eta = 1.7580 \times 10^{-10} \times \frac{380}{107 + T} \times \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (2)$$

ポケットに音速またはそれに近い速度で

流入した空気はポケット内でいったんその速度を失うので、オリフィスを通じたさいの断熱膨張による温度降下分は速度エネルギーの熱への変換により、ポケット内において回復されるものと考えられる。したがってポケットから長方形すきまへと流れていく空気の最初の温度は常温と考えることができる。圧力 P_p から P まで断熱膨張すると圧力 P の空気の温度 T は常温を T_0 、 κ を空気の比熱の比として次式によって与えられる。

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_p} \right)^{\kappa-1/\kappa} \quad (3)$$

式(1)に断熱変化における容積 V と圧力 P との関係

$$PV^\kappa = P_a V_a^\kappa$$

および式(2)、式(3)を代入すると式(1)は次式のようになる。

$$V_a = - \frac{\pi D h_0^3}{12 n P_a^{1/\kappa}} \frac{\{107 + T_0 (P/P_p)^{\kappa-1/\kappa}\} P^{1/\kappa}}{1.4810 \times 10^{-11} \{T_0 (P/P_p)^{\kappa-1/\kappa}\}^{3/2}} \frac{dP}{dx} \quad (4)$$

ここで $x=0$ において $P=P_p$ 、 $x=l_2$ において $P=P_a$ の境界条件にしたがって上式を積分すると

$$V_a = \frac{\pi D}{12 l_2 n P_a^{1/\kappa}} Y \quad (5)$$

ここに

$$\begin{aligned} Y &\equiv \int_{P_a}^{P_p} \frac{\{107 + T_0 (P/P_p)^{\kappa-1/\kappa}\} P^{1/\kappa}}{1.4810 \times 10^{-11} \{T_0 (P/P_p)^{\kappa-1/\kappa}\}^{3/2}} dP \\ &= 7.2248 \times 10^{12} \frac{2\kappa}{(5-\kappa) T_0^{3/2}} \\ &\quad \times [P_p^{\kappa+1/\kappa} - P_a^{5-\kappa/2\kappa} P_p^{3(\kappa-1)/2\kappa}] \\ &\quad + 6.7522 \times 10^{10} \frac{2\kappa}{(3+\kappa) T_0^{1/2}} \\ &\quad \times [P_p^{\kappa+1/\kappa} P_a^{3+\kappa/2\kappa} P_p^{\kappa-1/2\kappa}] \end{aligned}$$

軸受出口における空気の比重量 γ は大気圧 P_a で常温における比重量を γ_0 とすれば、断熱膨張による温度降下を考慮すると次式によって与えられる。

$$\gamma = \gamma_0 \left(\frac{P_p}{P_a} \right)^{\kappa-1/\kappa}$$

式(5)に γ をかけることにより、単位時間に軸受より流出するポケット1個あたりの空気の重量 w_{out} は次式によって与えられる。

$$w_{out} = \frac{\pi D h_0^3}{12 l_2 n P_a^{1/\kappa}} \cdot Y \cdot \left(\frac{P_p}{P_a} \right)^{\kappa-1/\kappa} \cdot \gamma_0 \quad (6)$$

一方、オリフィスを通して単位時間にポケット内に流

表1 ポケット圧力とラジアルクリアランスとの関係

($P_s=6\text{kg/cm}^2$, $D=5\text{cm}$, $l_2=3\text{cm}$, $d=0.4\text{mm}$, $n=4$)

$P_p(\text{kg/cm}^2)$		5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
用いた式	h_0	18.4	21.7	24.6	27.5	30.7	34.8	40.3	49.1	66.8
	(μ)	18.3	21.6	24.4	27.3	30.5	34.6	40.1	48.9	66.7

入する空気重量 w_{in} は、オリフィス径を d 、流量係数を c とすれば元圧 P_s のとき次式によって与えられる。

$$w_{in} = k \cdot c \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \frac{P_s}{\sqrt{R T_0}} \quad (7)$$

ここに、 R はガス常数、 k はオリフィスの流出速度係数で重力の加速度を g とすれば次式によって与えられる。

$$k = \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{P_p}{P_s} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_p}{P_s} \right)^{\kappa+1/\kappa} \right\}} : \frac{P_p}{P_s} > 0.528$$

$$k = \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\kappa/\kappa+1}} : \frac{P_p}{P_s} < 0.528$$

流れの連続より流入空気重量と流出空気重量とを等しいと置くことにより、軸受のポケット圧力 P_p は次式によって求めることができる。

$$\frac{\pi D h_0^3}{12 l_2 n P_a} Y P_p^{\kappa-1/\kappa} \gamma_0 = k \cdot c \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \frac{P_s}{\sqrt{R T_0}} \quad (8)$$

大気圧 $P_a=1\text{kg/cm}^2$ 、常温 $T_0=288^\circ\text{K}$ 、 $\gamma_0=1.226 \times 10^{-6}\text{kg/cm}^3$ 、 $c=0.85$ 、 $R=29.27\text{m}^2/\text{K}$ 、 $\kappa=1.4$ の値を上式に代入し、 h_0 を μ 、 d を mm であらわせれば、ポケット圧力 P_p は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} &3.6817 P_p^2 - (1.1497 P_p^{0.2857} + 2.5320) P_p^{0.4286} \\ &= 2.2654 \times 10^5 \frac{d^2 l_2 n}{D h_0^3} k \cdot P_s \end{aligned} \quad (9)$$

つぎに、簡単にポケット圧力を算出する方法として、空気の粘性係数を一定とし、ポケット圧力 P_p から大気圧 P_a まで断熱膨張するさいの空気の平均温度 T_m

$$T_m = T_0 \left(\frac{P_p + P_a}{2 P_p} \right)^{\kappa-1/\kappa}$$

における粘性係数の値 η_m をとって近似計算を行なうことにする。この場合、 w_{out} は式(6)のかわりとして次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} w_{out} &= \frac{\pi D}{12 \eta_m P_a^{1/\kappa} n} \frac{h_0^3}{l_2} \frac{\kappa}{\kappa+1} \{P_p^{\kappa+1/\kappa} - P_a^{\kappa+1/\kappa}\} \\ &\quad \times \left(\frac{P_p}{P_a} \right)^{\kappa-1/\kappa} \cdot \gamma_0 \end{aligned} \quad (10)$$

式(7)と式(10)より軸受のポケット圧力 P_p は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} P_p^{\kappa+1/\kappa} - P_a^{\kappa+1/\kappa} &= \frac{\kappa+1}{\kappa} \frac{3 d^2 n l_2}{D} \frac{c \gamma_m}{\gamma_0 \sqrt{R T_0}} \frac{k}{h_0^3} \\ &\quad \times \left(\frac{P_s}{P_a} \right) P_p^{1-\kappa/\kappa} \end{aligned} \quad (11)$$

まえと同じ各数値を上式に代入し、 h_0 を μ 、 d を mm

であらわせば、ポケット圧力 P_p は次式によって与えられる。

$$P_p^{1.7143} - 1 = 3.8836 \times 10^{14} \eta_m \frac{d^2 l_2 n}{D h_0^3} k P_s P_p^{0.2857} \quad (12)$$

表1は一例として式(9)および式(12)によって計算した元圧 $P_s = 6 \text{ kg/cm}^2$ におけるポケット圧力とラジアルすきまの値を示したものである。もとにした軸受は円周上にポケットが4個で2列配置されたジャーナル軸受で、その寸法は $D = 5 \text{ cm}$, $l_2 = 3 \text{ cm}$, $d = 0.4 \text{ mm}$ である。式(12)による近似計算でも十分な精度の得られることが同表より明らかである。

2.2 偏心状態におけるポケット圧力

ジャーナル軸受が偏心すると各ポケット間に圧力差を生じ、軸受内の空気は円周方向にも流れることになる。ここでは円周上にポケットが4個で2列配置されたジャーナル軸受が図2に示すように偏心した場合の各ポケットの圧力を導く。なお、円周上に配置されたポケットの数がこれと異なる場合でも同じ考え方によってそのポケット圧力を求めることができる。軸受断面を同図に示すようにポケットを中心として4つの領域に分割し、最小すきま位置にあるポケットをポケット1、最大すきま位置にあるポケットをポケット2、中立位置にあるポケットをポケット3とし、各ポケットの圧力をそれぞれ P_1 , P_2 , P_3 とする。円周方向流れの流路としては図2付図(a)に示すような長さ $\pi D/4$ 、幅 $(l_1 + l_2)/2$ 、すきまが各領域の境界における軸受すきまの値を持つ長方形の流路を仮想する。仮想流路の幅を $(l_1 + l_2)/2$ としたのは、軸受の軸方向圧力分布を図2付図(b)に示すように直線的であると仮定して正味の軸受圧力の作用する幅をとったものである。軸受内の空気の流れはすべて断熱的であると、空気の粘性係数 η に断熱膨張による温度降下の平均温度における値をとることにより、偏心状態におけるポケット圧力 P_1 , P_2 , P_3 をつぎのようにして求めることができる。

2.2.1 ポケット圧力 P_1

ポケット1へ単位時間に流入する空気の重量はオリフィスよりの流入量 w_{1in} で式(7)と同じ形で次式によって与えられる。

$$w_{1in} = k_1 c - \frac{\pi}{4} d^2 \frac{P_s}{\sqrt{RT_0}}$$

ここで、 k_1 は元圧 P_s からポケット圧 P_1 へ噴出するときのオリフィスの流出速度係数である。一方、ポケット1から単位時間に流出する空気重量は、軸方向の流出量 w_{10} とポケット3への円周方向流れ w_{13} とである。 w_{10} および w_{13} は式(10)よりそれぞれ次式によって与え

付図(a) 円周方向流れの仮想流路 付図(b) 軸方向圧力分布

付図(c) 円周方向の圧力分布

図2 偏心した静圧ジャーナル空気軸受

られる。

$$w_{10} = \frac{(\pi/4) D h_1^3}{12 \eta_{10} l_2 P_a^{1/\kappa}} \frac{\kappa}{\kappa+1} (P_1^{\kappa+1/\kappa} - P_a^{\kappa+1/\kappa}) \gamma_0 \times \left(\frac{P_1}{P_a} \right)^{\kappa-1/\kappa} \quad (13)$$

$$w_{13} = \frac{\{(l_1 + l_2)/2\} h_{13}^3}{12 \eta_{13} (\pi/4) D P_a^{1/\kappa}} \frac{\kappa}{\kappa+1} (P_1^{\kappa+1/\kappa} - P_3^{\kappa+1/\kappa}) \times \gamma_0 \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^{\kappa-1/\kappa} \left(\frac{P_3}{P_a} \right)^{1/\kappa} \quad (14)$$

ここに、 h_1 は領域Iの平均すきま、 h_{13} は領域Iと領域IIIとの境界におけるすきまそれぞれ近似的に次式で与えられるものである。

$$h_1 = 0.5 \cdot h_0 \{2 - \varepsilon (1 + \cos 45^\circ)\}$$

$$h_{13} = h_0 (1 - \varepsilon \cdot \cos 45^\circ)$$

ここで ε は偏心率また η_{10} は圧力 P_1 から P_a まで、 η_{13} は圧力 P_1 から P_3 まで断熱膨張したさいのそれぞれの平均温度における空気の粘性係数である。

流れの連続から流入空気重量と流出空気重量とを等しいと置くことにより、 P_1 が決定される。ちなすなわ

$$w_{1in} = w_{10} + w_{13}$$

より、ポケット1の圧力 P_1 は次式によって与えられる。

$$P_1^{\kappa-1/\kappa} - P_a^{\kappa+1/\kappa} = \frac{\eta_{10} \cdot l_2}{\left(\frac{\pi}{4} \right) D h_1^3} \times \left[\frac{\kappa+1}{\kappa} \frac{12 P_a^{1/\kappa}}{\eta_0 \sqrt{RT_0}} k_1 c - \frac{\pi}{4} d^2 P_s \right]$$

表2 静圧ジャーナル空気軸受のポケット圧力の計算例
($P_s=6\text{kg/cm}^2$, $D=5\text{cm}$, $l_1=6\text{cm}$, $l_2=3\text{cm}$, $d=0.4\text{mm}$, $h_0=31\mu$, $n=4$)

偏心率 圧力 (kg/cm^2)	近似回数	0.1			0.2			0.3			0.4			0.6		
		P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
第1近	第1近	3.46	3.29	3.38	3.67	3.18	3.38	3.88	3.12	3.38	4.17	3.06	3.38	4.87	2.98	3.38
第2近	第2近	3.46	3.29	3.38	3.65	3.17	3.37	3.85	3.10	3.35	4.12	3.02	3.30	4.82	2.86	3.21
第3近	第3近	3.46	3.29	3.38	3.65	3.17	3.37	3.84	3.09	3.34	4.10	3.00	3.27	4.80	2.79	3.12
第4近	第4近	3.46	3.29	3.38	3.65	3.17	3.37	3.84	3.09	3.34	4.10	2.99	3.26	4.80	2.76	3.07

$$-\left(\frac{l_1+l_2}{4}\right) \frac{h_{13}^3}{D\eta_{13}} (P_1^{\kappa+1/\kappa} - P_3^{\kappa+1/\kappa}) \times \left(\frac{P_1}{P_3}\right)^{\kappa-1/\kappa} \left(\frac{P_3}{P_a}\right)^{1/\kappa} \left(\frac{P_a}{P_1}\right)^{\kappa-1/\kappa} \quad (15)$$

2.2.2 ポケット圧力 P_3

ポケット1の圧力 P_1 を求めたのと同じ方法によりポケット3の圧力 P_3 を求めることができる。すなわち、ポケット3に単位時間に流入する空気重量はオリフィスからの流入量 w_{3in} とポケット1からの円周方向流れによる流入量 w_{13} とであり、ポケット3から単位時間に流出する空気重量は軸方向の流出量 w_{30} とポケット2への円周方向流れ w_{32} とである。

流入空気重量と流出空気重量とを等しいと置くことにより P_3 が決定される。すなわち

$$w_{3in} + w_{13} = w_{30} + w_{32}$$

より、ポケット3の圧力 P_3 は次式によって与えられる。

$$P_3^{\kappa+1/\kappa} - P_a^{\kappa+1/\kappa} = \frac{\eta_{30} l_2}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D h_3^3} \times \left\{ \frac{\kappa+1}{\kappa} \frac{12 P_a^{1/\kappa}}{\gamma_0 \sqrt{RT_0}} k_3 c \frac{\pi}{4} d^2 P_s + \frac{\{(l_1+l_2)/2\}}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D} \times \left\{ \frac{h_{13}^3}{\eta_{13}} (P_1^{\kappa+1/\kappa} - P_3^{\kappa+1/\kappa}) \left(\frac{P_1}{P_3}\right)^{\kappa-1/\kappa} \left(\frac{P_3}{P_a}\right)^{1/\kappa} - \frac{h_{32}^3}{\eta_{32}} (P_3^{\kappa+1/\kappa} - P_2^{\kappa+1/\kappa}) \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\kappa-1/\kappa} \left(\frac{P_2}{P_a}\right)^{1/\kappa} \right\} \times \left(\frac{P_a}{P_3}\right)^{\kappa-1/\kappa} \right\} \quad (16)$$

ここに、 k_3 は元圧 P_s からポケット圧 P_3 へ噴出するときのオリフィスの流出速度係数、 $h_3=h_0$ でラジアルすきま、 h_{32} は領域Ⅲと領域Ⅱとの境界の軸受すきまで次式によって与えられるものである。

$$h_{32}=h_0(1+\varepsilon \cdot \cos 45^\circ)$$

また η_{30} および η_{32} は圧力 P_3 から P_a までおよび圧力 P_3 から P_2 まで断熱膨張したさいのそれぞれの平均温度における空気の粘性係数である。

2.2.3 ポケット圧力 P_2

同様にしてポケット2の圧力 P_2 を求めることができ

る。すなわち、ポケット2に単位時間に流入する空気重量はオリフィスからの流入量 w_{2in} とポケット3からの円周方向流れによる流入量 w_{32} とであり、ポケット2から単位時間に流出する空気重量は軸方向の流れ w_{20} のみである。

流入空気重量と流出空気重量とを等しいと置くことにより P_2 が決定される。すなわち

$$w_{2in} + 2w_{32} = w_{20}$$

より、ポケット2の圧力 P_2 は次式によって与えられる。

$$P_2^{\kappa+1/\kappa} - P_a^{\kappa+1/\kappa} = \frac{\eta_{20} l_2}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D h_2^3} \left\{ \frac{\kappa+1}{\kappa} \frac{12 P_a^{1/\kappa}}{\gamma_0 \sqrt{RT_0}} \times k_2 c \frac{\pi}{4} d^2 P_s + \frac{(l_1+l_2) h_{32}^3}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D \eta_{32}} (P_3^{\kappa+1/\kappa} - P_2^{\kappa+1/\kappa}) \times \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\kappa-1/\kappa} \left(\frac{P_2}{P_a}\right)^{1/\kappa} \left(\frac{P_a}{P_2}\right)^{\kappa-1/\kappa} \right\} \quad (17)$$

ここに k_2 は元圧 P_s からポケット圧 P_2 に噴出するときのオリフィスの流出速度係数、 h_2 は領域Ⅱの平均すきまで次式によって与えられるものである。

$$h_2=0.5 \cdot h_0 \{2+\varepsilon(1+\cos 45^\circ)\}$$

また η_{20} は圧力 P_2 から P_a まで断熱膨張したさいの平均温度における空気の粘性係数である。

式(15)、式(16)および式(17)を用い、試行錯誤法により偏心状態にあるこの種の軸受のポケット圧力 P_1 , P_2 , P_3 を算出することができる。すなわち、第1近似として中立位置のポケット3につき、円周方向流れの流入空気重量と流出空気重量とが等しいと仮定する。これよりポケット3の圧力 P_3 は軸方向の流れのみを考えた式(8)あるいは式(11)によって容易に計算することができ、この P_3 によって式(15)、式(16)から P_1 , P_2 が計算できる。さらに第2近似としては、第1近似で求めた P_1 , P_2 をもとに式(16)から P_3 を計算し式(15)、式(17)に代入して P_1 , P_2 を計算することができる。

表2はポケット圧力の第1近似から第4近似までの計算値の一例で元圧 $P_s=6\text{kg/cm}^2$ の場合を示したもので

ある．もとにした軸受は円周上にポケットが4個で2列配置されたもので， $D=5\text{cm}$ ， $l_1=6\text{cm}$ ， $l_2=3\text{cm}$ ， $d=0.4\text{mm}$ ， $h_0=31\mu$ のジャーナル軸受である．この表から明らかなように偏心率 ε が0.3以下の範囲においては第1近似と第4近似との差はほとんど認められない．したがってポケット圧力の計算にあたっては偏心率の小さい場合，中立位置のポケットでは円周方向流れの影響が打消しあうとしてそのポケット圧力を求める第1近似の計算で十分であるといえる．

2.3 軸受負荷能力

まえと同じ円周上にポケットが4個で2列配置された形の静圧ジャーナル空気軸受の負荷能力 W を求める．

いま，軸受内の圧力分布を軸方向には図2付図(b)に示すように直線的であると仮定し，2列のポケットにはさまれた部分Aにおける円周方向の圧力分布を(i)直線的，(ii)正弦曲線的であると仮定する．

(i) 円周方向圧力分布を直線的と仮定した場合

この場合，円周方向の圧力分布は図2付図(c)の実線に示す形で次式によって与えられる．

軸受下半分 (左右対称)

$$P = P_1 - \frac{2(P_1 - P_3)}{\pi} \theta \quad : \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\right)$$

軸受上半分 (左右対称)

$$P = P_3 - \frac{2(P_3 - P_2)}{\pi} \left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad : \left(\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi\right) \quad (18)$$

ここに，角度 θ は軸受の最小すきま位置より反時計方向にとった角度である．

式(18)によって示される軸受圧力 P によってこの軸受の二つのポケットにはさまれた部分Aの単位長さにも働く上向き (反負荷方向) の力 F_1 は次式によって与えられる．

$$F_1 = 2 \int_0^{\pi/2} P \cdot \frac{D}{2} \cos \theta d\theta = \left\{ P_3 + \frac{2(P_1 - P_3)}{\pi} \right\} D$$

($D=5\text{cm}$ ， $l_1=6\text{cm}$ ， $l_2=3\text{cm}$ ， $d=0.4\text{mm}$ ， $h_0=31\mu$)

図3 静圧ジャーナル空気軸受

同様にしてこの軸受の同部分に働く下向き (負荷方向) の力 F_2 は次式によって与えられる．

$$F_2 = \left\{ P_3 - \frac{2(P_3 - P_2)}{\pi} \right\} D$$

軸受の軸方向圧力分布を図2付図(b)に示すように直線的と仮定したから，負荷能力 W は次式によって与えられる．

$$W = (l_1 + l_2)(F_1 - F_2) = (l_1 + l_2) \cdot \frac{2}{\pi} D(P_1 - P_2) \quad (19)$$

(ii) 円周方向圧力分布を正弦曲線的と仮定した場合

この場合，円周方向圧力分布は図2付図(c)の破線に示す形で次式によって与えられる．

軸受下半分 (左右対称)

$$P = (P_1 - P_3) \cos \theta + P_3 \quad : \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\right)$$

軸受上半分 (左右対称)

$$P = (P_3 - P_2) \cos \theta + P_3 \quad : \left(\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi\right) \quad (20)$$

これより軸受の負荷能力 W はまえと同様の計算により次式によって与えられる．

$$W = (l_1 + l_2)(F_1 - F_2) = (l_1 + l_2) \cdot \frac{\pi}{4} D(P_1 - P_2) \quad (21)$$

式(19)および式(21)から明らかなように，円周方向圧力分布を正弦曲線的と仮定した場合の方が負荷能力は約20%大きくなる．いずれの仮定が正しいかは実験値と比較して検討しなければならない．

3. 実験および理論値との比較

3.1 実験装置および方法

図3は静圧ジャーナル空気軸受の負荷能力およびポケット圧力を測定するために作製した軸受装置である．この軸受は直径12mmのポケットが円周上に4個で2列配置され，軸直径 $D=5\text{cm}$ ，軸受長さ $l=12\text{cm}$ ，圧力降下部分の長さ $l_2=3\text{cm}$ ，ポケット間距離 $l_1=6\text{cm}$ ，給気口オリ

①試験用軸受 ②0.001mmダイヤルゲージ ③荷重用てこ ④ポケット圧力測定用圧力計 ⑤軸受位置調整ねじ

図4 軸受負荷能力およびポケット圧力の測定法

フィスの径 $d=0.4\text{mm}$, ラジアルすきま $h_0=31\mu$ である。

図4はこの軸受を用いて行なった軸受負荷能力ならびにポケット圧力の測定法を示したものである。同図において①は軸受で③で荷重を加えた。負荷能力の測定では④に示すポケット圧力測定用圧力計およびそれへの導管をとりはずし、その部分にはねじでせんをした。こうして元圧 P_s , 荷重 W における浮き上り量 t を②に示す 0.001mm のダイヤルゲージで測定し負荷能力曲線を得た。ポケット圧力の測定では④のポケット圧力測定用圧力計をあらためて装置にとりつけ、圧力測定孔を順次各ポケットの中央に一致させることにより元圧 P_s , 荷重 W , 偏心率 ϵ におけるポケット圧力 P_1, P_2, P_3 を測定した。

3.2 実験結果および理論値との比較

3.2.1 ポケット圧力

図5に図3に示したジャーナル軸受の元圧 $P_s=6\text{kg/cm}^2$ におけるポケット圧力と偏心率との関係を示す。同図において○, ●, ×はそれぞれ P_1, P_3, P_2 の実測値を示したものである。また同図の実線は式(19), 式(20)および式(21)により計算したポケット圧力の第4近似値である。同図から明かなように第4近似値まで計算を行なえば、偏心率の大きい場合でも計算値は実測値ときわめてよい一致を示す。

3.2.2 負荷能力

図6に図3に示したジャーナル軸受の $P_s=6\text{kg/cm}^2$ における負荷能力曲線を示す。同図において●で示した点は実測値、実線は円周方向圧力分布を直線的とした式(19)による負荷能力の計算値、破線は正弦曲線的とした式(20)による計算値である。図から明かなように負荷能力の実測値は円周方向の圧力分布を正弦曲線的と考えるよりも、むしろ直線近似による計算値とかなりよい一致を示している。なお、偏心率が大きくなると直線近似としても計算値との間に差を生じているが、これは軸方向圧力分布を図2付図(b)に示すように、二つのポケットにはさまれた部分Aは一樣にポケット圧力が作用しているとしたためであろう。偏心率の小さい場合はポケット圧力 P_1 と P_2 との間にはあまり差がなく、したがって図2付図(b)のように仮定した圧力分布は実際と比べてあまり大きな差は生じないが、偏心率が大きくと P_1 と P_2 との差が大きくなるとこの仮定が成立しなくなるためと考えられる。

4. 結 論

(1) 静圧ジャーナル空気軸受の同心状態におけるポケット圧力を、軸受内の空気が断熱変化の粘性流をなすものとし、空気の比重量および粘性係数の温度変化を考慮

図5 静圧ジャーナル空気軸受のポケット圧力

図6 静圧ジャーナル空気軸受の負荷能力

にいて導いた。

(2) 静圧ジャーナル空気軸受の偏心した場合のポケット圧力を与える式を、軸受内の円周方向流れを考慮にいて導いた。

(3) 偏心した場合のポケット圧力をもとにして、静圧ジャーナル空気軸受の負荷能力を与える式を求めた。

(4) ポケット圧力の測定を行ない計算値との比較を行なった。実測値は計算値ときわめてよい一致を示した。また、偏心率のあまり大きくない範囲においては、中立位置のポケットについて円周方向流れによる流入量と流出量とが打ち消しあうとしても実用上十分な精度で計算できることがわかった。

(5) 負荷能力の測定を行ない計算値との比較を行なった。実測値は軸受内の円周方向圧力分布を直線的と仮定した計算値とかなりよい一致を示した。

最後に、本研究にあたりご指導賜りました東北大学佐藤健児教授、淵沢定敏教授、酒井高男教授ならびに電気試験所小林昭博士に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 十合晋一：静圧空気軸受に関する研究(第2報) 一空気軸受の圧力分布について、精密機械, 30, 6(1964)468.
- 2) 日本機械学会：機械工学便覧, 日本機械学会, 10, 4(1961).